第8講　化学平衡
PART1　平衡定数

目標　・平衡状態とは何かを理解し，平衡定数を使った計算をマスターしよう！

Chapter1　可逆反応と化学平衡

要点

化学平衡の状態（平衡状態）

・可逆反応において，正反応と逆反応の速さが一致し，見かけ上反応が停止した状態。

◆ 可逆反応　重要

正反応（右向きの反応）も逆反応（左向きの反応）も進行する反応を**可逆反応**という。

例　$x\mathrm{A}+y\mathrm{B} \rightleftarrows z\mathrm{C}$

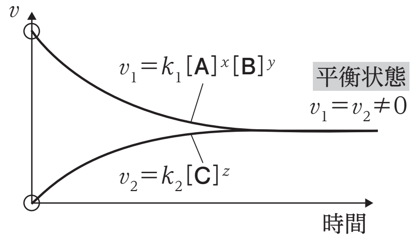
◆ 化学平衡　重要

可逆反応をしばらく放置すると，正反応の速さ v_1 と逆反応の速さ v_2 が一致し，見かけ上反応が停止した状態になる。これを**化学平衡**の状態（**平衡状態**）という。

このとき，正反応も逆反応も停止していない（$v_1=v_2 \neq 0$）ことに注意しよう。

例　$x\mathrm{A}+y\mathrm{B} \rightleftarrows z\mathrm{C}$

正反応の速さ（$v_1=k_1[\mathrm{A}]^x[\mathrm{B}]^y$）と逆反応の速さ（$v_2=k_2[\mathrm{C}]^z$）は以下のように変化する。



正反応の速さ	⇒	v_1
逆反応の速さ	⇒	v_2
見かけの速さ	⇒	v_1-v_2

また，正反応の速さと逆反応の速さの差（v_1-v_2）を見かけの速さという。

まとめ

・可逆反応において，正反応の速さと逆反応の速さが一致し，見かけ上反応が停止した状態を（　　　　　　）の状態，または（　　　　　　）という。

Chapter2　平衡定数

要点

平衡定数

化学反応 x A + y B ⇄ z C が平衡状態にあるとき，以下の式が成立する。

$$K_c = \frac{[C]^z}{[A]^x[B]^y}$$

◆ 平衡定数　重要

化学反応 x A + y B ⇄ z C について考えよう。

正反応の速さ v_1 と逆反応の速さ v_2 を以下のように表すことができるとする。

$$v_1 = k_1[A]^x[B]^y$$

$$v_2 = k_2[C]^z$$

この反応が平衡状態（$v_1 = v_2$）にあるとき，次のようになる。

$$k_1[A]^x[B]^y = k_2[C]^z$$

この式を変形すると以下のようになる。

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{[C]^z}{[A]^x[B]^y}$$

k_1 と k_2 は定数であるため，$\frac{k_1}{k_2}$ も定数となる。この定数を平衡定数 K_c といい，この定数は温度が一定のときには常に一定である。

まとめると，以下のようになる。

上記の化学反応が平衡状態にあるとき，以下の式が成立する。

$$K_c = \frac{k_1}{k_2} = \frac{[C]^z}{[A]^x[B]^y}$$

このような関係を**化学平衡の法則（質量作用の法則）**という。

まとめ

・化学反応 xA + yB ⇄ zC（正反応の速さ $v_1 = k_1[A]^x[B]^y$，逆反応の速さ $v_2 = k_2[C]^z$）が平衡状態にあるとき，以下の式が成立する。

K_c =（　　）=（　　　　）

Chapter3　平衡定数を使った計算

要点

平衡定数を使った計算

「反応前」「変化量」「平衡後」の情報を表にし，「平衡後」のデータをモル濃度に変えて平衡定数に代入する。

◆ 平衡定数を使った計算　重要

平衡定数を使った計算では，「反応前」「変化量」「平衡（に達した）後」のデータを表にし，「平衡後」のデータをモル濃度に変えて平衡定数 K_c に代入する。

例題

次の可逆反応について以下の問いに答えよ。

$H_2 + I_2 \rightleftarrows 2HI$

2.0L の容器に H_2 1.0 mol と I_2 1.0 mol を入れ，ある温度で一定に保ったところ，HI が 1.6 mol 生成して平衡状態となった。この温度における平衡定数 K_c を求めよ。

考え方

まず，「反応前」「変化量」「平衡後」の情報を表にしてみる。（与えられたデータ（下線）以外の部分を自分で書いてみる）

	H_2	+ I_2	⇄ 2HI (2.0L)
反応前	1.0mol	1.0mol	0mol
変化量	− 0.80mol	− 0.80mol	+1.6mol
平衡後	0.20mol	0.20mol	1.6mol

次に，平衡定数 K_c の中に代入する。このとき，与えられたデータをモル濃度に変えることを忘れないようにする。

（この反応は左辺と右辺の係数の和が一致しているため，体積を忘れても影響はないが，係数の和が一致しない反応では平衡定数が変わってしまうため注意が必要である）

$$K_c = \frac{\left(\frac{1.6}{2.0}\right)^2}{\left(\frac{0.20}{2.0}\right)\left(\frac{0.20}{2.0}\right)} = \underline{\underline{64}}$$

平衡定数 K_c は係数によって単位も変化するため気をつける。上記の反応では単位はない。

まとめ

・平衡定数 K_c を使った計算では，「反応前」「変化量」「平衡後」のデータを表にし，（　　　　　）のデータを（　　　　　）に変えて平衡定数に代入する。

Chapter4　圧平衡定数

要点

圧平衡定数

化学反応 xA + yB ⇄ zC（A・B・C は気体）が平衡状態にあるとき，A・B・C の分圧をそれぞれ P_A・P_B・P_C とすると，以下の式が成立する。

$$K_p = \frac{(P_C)^z}{(P_A)^x(P_B)^y}, \quad K_c = K_p(RT)^{x+y-z}$$

◆ 圧平衡定数　重要

化学反応 xA + yB ⇄ zC（A・B・C は気体）について考えよう。

この反応が平衡状態にあるとき，化学平衡の法則より以下のように平衡定数 K_c が成立する。

$$K_c = \frac{[C]^z}{[A]^x[B]^y} \cdots ①$$

また，A・B・C は気体なので，気体の状態方程式より $\frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$ が成立する。よって，①式のモル濃度に $\frac{P}{RT}$ を代入してみよう。A・B・C の分圧をそれぞれ P_A・P_B・P_C とすると以下のように表すことができる。

$$K_c = \frac{\left(\frac{P_C}{RT}\right)^z}{\left(\frac{P_A}{RT}\right)^x\left(\frac{P_B}{RT}\right)^y} \cdots ②$$

そして，②式の（RT）をまとめると以下のように表すことができる。

$$K_c = \frac{(P_C)^z}{(P_A)^x(P_B)^y}(RT)^{x+y-z} \cdots ③$$

③式において，左辺の K_c と右辺の $(RT)^{x+y-z}$ は温度が変化しない限り一定値であるため，$\frac{(P_C)^z}{(P_A)^x(P_B)^y}$ も同様に定数である。この定数を圧平衡定数 K_p とする。

$$K_c = K_p(RT)^{x+y-z}$$

まとめると，反応が平衡状態にあるとき，平衡定数 K_c と圧平衡定数 K_p の関係は

$$K_c = K_p(RT)^{左辺の係数の和-右辺の係数の和}$$

となる。この関係式も重要なのでしっかり押さえておこう。

まとめ

・化学反応 $xA + yB \rightleftarrows zC$（A・B・C は気体）が平衡状態にあるとき，A・B・C の分圧をそれぞれ P_A・P_B・P_C とすると，以下の式が成立する。

$K_c = ($　　　　　　　$)(RT)^{x+y-z} = K_p(RT)^{x+y-z}$

分圧を用いた式

Chapter5　圧平衡定数を用いた計算

要点

圧平衡定数を用いた計算

「モル比＝分圧比」が成立するため，物質量で表を作り，平衡後のデータを圧平衡定数 K_p に代入する。

◆ 圧平衡定数を用いた計算

例題

容積 10L の密閉容器に四酸化二窒素 N_2O_4 を入れ，ある温度で一定に保ったところ，N_2O_4 の 40%が解離して二酸化窒素 NO_2 に変化した。

$$N_2O_4 \rightleftarrows 2NO_2$$

平衡に達した後の全圧が 1.0×10^5Pa であったとき，この温度における圧平衡定数を求めよ。

考え方

反応前の N_2O_4 を n mol として，表を作る。

	N_2O_4	$\rightleftarrows$	$2NO_2$	
反応前	n mol		0 mol	
変化量	− 0.4n mol		+0.8n mol	
平衡後	0.6n mol		0.8n mol	計 1.4n mol

反応後の合計物質量 1.4n mol に相当する圧力が 1.0×10^5Pa である。平衡時の N_2O_4 と NO_2 の分圧はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$P_{N_2O_4} = 1.0 \times 10^5 \times \frac{0.6n}{1.4n} = \frac{3}{7} \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_{NO_2} = 1.0 \times 10^5 \times \frac{0.8n}{1.4n} = \frac{4}{7} \times 10^5 \text{ Pa}$$

以上より，圧平衡定数は以下のように求めることができる。

$$K_p = \frac{(P_{NO_2})^2}{P_{N_2O_4}} = \frac{\left(\frac{4}{7} \times 10^5\right)^2}{\frac{3}{7} \times 10^5} = \frac{16}{21} \times 10^5 = 7.61 \times 10^4 \quad \underline{7.6 \times 10^4 \text{ Pa}}$$

まとめ

・圧平衡定数を用いた計算では，（　　　　　　）の表を作り，「モル比＝分圧比」を用いて各気体の分圧を求めて圧平衡定数に代入する。

Chapter6　演習問題

問　容積 2.0L の密閉容器に H_2 と I_2 を 1.5mol ずつ入れて，ある温度に保ったところ平衡状態になった。

$$H_2 + I_2 \rightleftarrows 2HI$$

平衡状態での HI の物質量は何 mol か。

ただし，この温度における平衡定数は 64 とする。

第 8 講　PART1　確認問題

問 1　次の問いに答えよ。

(1)　4.0L の容器に H_2 2.0 mol と I_2 2.0 mol を入れ，ある温度で一定に保ったところ，HI が 2.4 mol 生成して平衡状態となった。

$$H_2 + I_2 \rightleftarrows 2HI$$

この温度における平衡定数 K_c として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 2.4　　② 9.0
③ 15　　④ 36

(2)　化学反応 $xA + yB \rightleftarrows zC$（A・B・C は気体）が平衡状態にあるとき，各気体の分圧と圧平衡定数 K_p の関係を表した式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，A・B・C の分圧はそれぞれ P_A・P_B・P_C とする。

① $K_p = \dfrac{(P_C)^z}{(P_A)^x(P_B)^y}$　　② $K_p = \dfrac{(P_A)^x(P_B)^y}{(P_C)^z}$

③ $K_p = \dfrac{z(P_C)}{x(P_A)+y(P_B)}$　　④ $K_p = \dfrac{x(P_A)+y(P_B)}{z(P_C)}$

(3)　化学反応 $xA + yB \rightleftarrows zC$（A・B・C は気体）が平衡状態にあるとき，平衡定数 K_c と圧平衡定数 K_p の関係を表した式として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。ただし，反応温度を T，気体定数を R とする。

① $K_c = K_p(RT)^{(x+y+z)}$　　② $K_c = K_p(RT)^{-(x+y+z)}$
③ $K_c = K_p(RT)^{(x+y-z)}$　　④ $K_c = K_p(RT)^{z-(x+y)}$

< Note >

第 8 講　化学平衡

PART1　平衡定数

問　2.4 mol

PART2　ルシャトリエの原理

問　⑴　左向き
⑵　移動しない
⑶　移動しない
⑷　左向き

PART3　工業的製法とルシャトリエの原理

問　⑴　発熱反応
⑵　③

PART4　水のイオン積・強酸強塩基のpH

問　12.7

PART5　弱酸・弱塩基の電離平衡

問　⑴　2.8
⑵　11

PART6　緩衝液・塩の加水分解

問　4.6

PART7　電離平衡の問題演習

Chapter2

問　3.0

Chapter3

問　4.6

Chapter4

問　⑴　2.8

⑵　4.6

⑶　加水分解 $CH_3COO^- + H_2O \rightleftarrows CH_3COOH + OH^-$により水酸化物イオンを生じるため

PART8　溶解度積

問　⑴　$1.7 \times 10^{-10}(mol/L)^2$

⑵　小さくなる

PART9　溶解度積の応用

問　生じていない

第 8 講　PART1　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：

各物質の「反応前」「変化量」「平衡後」の物質量はそれぞれ以下の通りとなる。

	H_2	+	I_2	⇄	2HI (4.0L)
反応前	2.0mol		2.0mol		0mol
変化量	− 1.2mol		− 1.2mol		+2.4mol
平衡後	0.80mol		0.80mol		2.4mol

よって，$K_c = \dfrac{\left(\dfrac{2.4}{4.0}\right)^2}{\left(\dfrac{0.80}{4.0}\right)\left(\dfrac{0.80}{4.0}\right)} = 9.0$ となる。

(2)　①

解説：

平衡状態であることから，平衡定数 K_c について $K_c = \dfrac{[C]^z}{[A]^x[B]^y}$ が成立する。気体の状態方程式より，$\dfrac{n}{V} = \dfrac{P}{RT}$ となるので，K_c は $K_c = \dfrac{\left(\dfrac{P_C}{RT}\right)^z}{\left(\dfrac{P_A}{RT}\right)^x\left(\dfrac{P_B}{RT}\right)^y}$ と表すことができる。(RT) をまとめると，$K_c = \dfrac{(P_C)^z}{(P_A)^x(P_B)^y}(RT)^{x+y-z}$ となる。左辺の K_c と右辺の $(RT)^{x+y-z}$ は温度が変化しない限りは一定値になるので，この定数を圧平衡定数 K_p とすると，$K_p = \dfrac{(P_C)^z}{(P_A)^x(P_B)^y}$ となる。

(3)　③

解説：

(2)の解説より，$K_c = K_p(RT)^{x+y-z}$ となる。